

金属の圧縮加工における表面状態と潤滑について

時沢 貢・室谷和雄

The Relationship between Lubrication and Surface Condition
of Metals Deformed under Compression

Mitsugu TOKIZAWA ・ Kazuo MUROTANI

This paper describes the results of a detailed study on the development of surface asperities produced during cold compression of single crystals, bicrystals and polycrystals of aluminum as well as polycrystalline copper, iron and zinc.

The conclusion is that the difference in the lubricating conditions according to the grain-size of metals is attributable to the hydro-static pressure generated in those trapped lubricants at a metal-tool interface. On the basis of this result, the mechanism of lubrication is discussed.

1. 緒言

近年、冷間塑性加工の分野が広まり、鉄鋼材料の冷間押し加工が可能になったが、最近さらに加工限界、製品の精度および加工表面の仕上げ状態などの向上が要求されるようになった。この目的を達成させるためには、まず金属材料に対する最適な潤滑方法のもとで塑性加工が行われるようにしなければならない。それで加工表面の凹凸の生成過程を表面の内側からも調べることに着目すれば、金属材料の組織が潤滑機構に及ぼす影響を検討することになるが、この種の研究は非常に少ない。Butler^{(1)~(3)}および田中ら^{(4)~(7)}は加工表面の微視的な凹凸と結晶のすべり帯模様とは密接な関係で潤滑作用をしていると報告したが、これはごく表面的な観察で境界潤滑状態における機構であった。

最近、著者らは金属材料の加工表面あらさの生成機構と潤滑作用との関係を調べる研究を進め、材料の加工表面あらさの変化は、加工前のあらさと潤滑剤の種類によって異なることを示し、あらさの変化する過程を解析した。^{(8)~(11)}その結果、任意の加工表面は、加工前のあらさの変化と加工中に新生されたあらさ

の変化によって形成されていることが明らかになった。ところが、要求される加工表面を得るには別の考え方が必要となった。そこで、本研究は加工表面あらさの生成過程を加工材料の内側（下部組織）との関連によって明らかにしている。それには結晶方位の明らかなアルミニウム単結晶、双結晶および3結晶、その他の純金属多結晶試料の潤滑圧縮を行い、加工表面の観察と記録が一致して対応できるように工夫した実験の手法によった。

2. 実験方法

実験に用いた試料はすべて純金属であり、主な内

表1 実験用試料

分類	材料と化学成分(%)	素 材 の 調 整	ビッカース かたさ Hv	結晶粒径 μm
純 金 属	純アルミニウム Al 99.99	ブリッジマン法と その改良形にて作製		単結晶 双結晶 3結晶
	工業用 純アルミニウム(2S) Al 99.27	50%冷間引抜きしたH材 H材を250℃ひずみとり H材を550℃焼なまし	36.3 33.0 31.7	0.01 0.01 0.12
	工業用純鉄(SUYBO) C 0.010 Cr 0.02 Si 0.14 P 0.008 Mn 0.07 S 0.012 Fe 残	650℃焼なまし 焼なまし材の5%冷間 圧縮後750℃焼なまし	95.0 64.2	0.05 0.36
	純 銅	H材を360℃焼なまし H材を900℃焼なまし	68.5 46.2	0.02 0.10
	純 亜 鉛	20%冷間鍛造材を 120℃焼なまし	33.0	0.05

容は表-1に示した。アルミニウム単結晶方位の決定はX線背面反射ラウエ法によるほか、過塩素酸と無水酢酸の混合液中にて電解研磨した後、王水と弗酸の混合溶液中で腐食するエッチピット法（食像）によった。そして方位の決定された厚さ6mm、幅30mmの板状結晶から直径15mmの円柱試料を放電加工機で切断した。また同じくブリッジマン法で作成した双結晶は、2個の種部に相当する素材の先端を槍状にする方法を採用して製作した。なお、圧縮加工前の試料の端面はすべて電解研磨し、表面あらさの最大深さ約 $0.2\mu\text{Rmax}$ 以下の平滑面とした。

圧縮変形には30tアムスラー形万能材料試験機を使用し、約 0.5mm/min の静的な冷間圧縮を行った。圧縮用工具は焼入れ工具鋼で、ロックウェルかたさHrc60、加工面は $0.1\mu\text{Rmax}$ 以下のラッピング仕上げとし、実験ごとにこの操作を繰返して清浄な面を保つようにした。使用した潤滑剤は液体状のスピンドル油[#]60、半固体状のジョンソンワックス[#]150および固体上のPTFEフィルム（厚さ 0.05mm ）を選んだ。

次に、加工表面の立体的な観察には光切断顕微鏡を、また加工表面の記録には、触針形高感度のTaly-surf Model 3を用いた。このとき加工表面の顕微鏡観察した位置と記録曲線の位置を一致させるため、あらかじめ触針の通過する位置の両端にマイクロビッカース計によって圧痕をつける方法で位置の確認を行った。

3. 実験結果および考察

3・1 単結晶試料

実験に供した単結晶試料の3種類の圧縮軸方位を図-1に示した。それらの試料端面にジョンソンワックスを塗布して圧縮した表面の観察結果を写真-1に示した。圧縮面が $\{111\}$ 面近傍の $\mathcal{N}6\text{I}$ 単結晶で

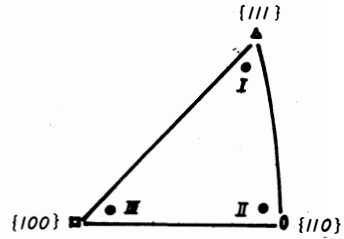
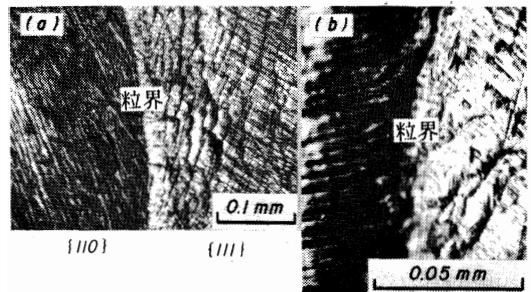


図-1 単結晶試料の方位

は細かい2重すべり帯を示し、 $\{100\}$ 面近傍の $\mathcal{N}6\text{III}$ 単結晶では同一方向のすべり帯、そして $\{110\}$ 面近傍の $\mathcal{N}6\text{II}$ 単結晶では主すべりが顕著で、それに鋸刃形のクニックが現われている。また、図は省略したが、加工前円形であった試料面の加工後の形状をみると、すべり方向に優先加工され、中でも $\mathcal{N}6\text{II}$ 単結晶では楕円形で、逆に $\mathcal{N}6\text{I}$ 単結晶はほぼ相似変形している。

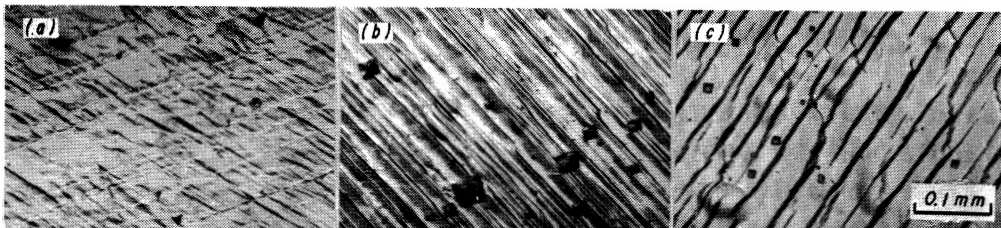
3・2 双結晶試料

写真-2の(a)は、圧縮面に $\{111\}$ 面と $\{110\}$ 面の近傍方位をもつ双結晶試料をジョンソンワックスを用いて圧縮ひずみ 0.35 を与えた加工表面の観察写真である。単結晶に比較して粒界を境にした異方向すべりが全体に現われ、ひだの明暗から推定しても著しい凹凸状態となる。そして $\{110\}$ 面側の結晶は



(b)は(a)の拡大写真

写真-2 双結晶(I)の潤滑圧縮した加工面



$\mathcal{N}6\text{I}$ 試料

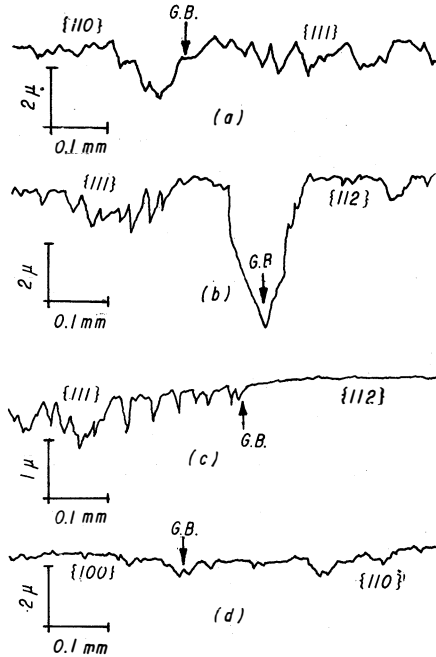
$\mathcal{N}6\text{II}$ 試料

$\mathcal{N}6\text{III}$ 試料

写真-1 単結晶の潤滑圧縮した加工面

一方向すべりで、 $\{111\}$ 面側では広角の2重すべり帯を示しているが、粒界付近 (G.B.) に近づくと次第に粒界に並進した黒く太いすべり帯がみられるようになる。そして写真-2の(b)に示すように粒界付近の $\{111\}$ 面側より大きなくぼみとなって現われる。これは図-2(a)の記録曲線からも明らかである。

次に、圧縮面に $\{111\}$ 面と $\{112\}$ 面の近傍方位をもつ双結晶試料を圧縮ひずみ0.3まで変形したジョンソンワックスを用いた結果を写真-3の(a)、(b)に、



(a)(b)(d) ジョンソンワックス
(c) スピンドル油

図-2 双結晶(I)(II)(III)の潤滑圧縮した加工面の記録

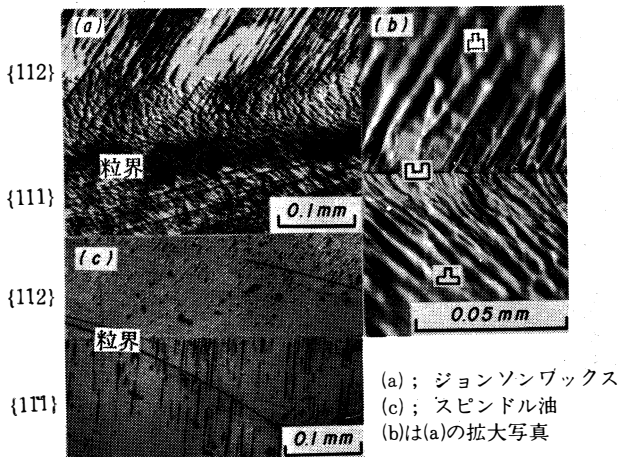
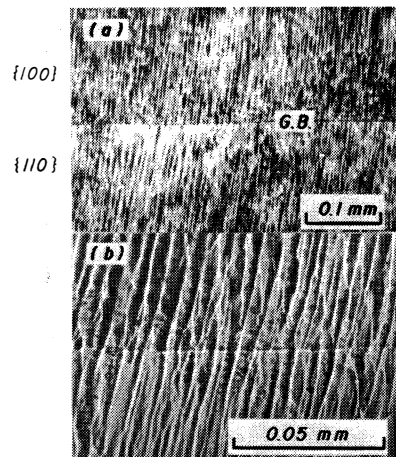


写真-3 双結晶(II)の潤滑圧縮した加工面

またスピンドル油を用いた圧縮結果を写真-3の(c)に示した。 $\{111\}$ 面側の面内ではさきの写真-1(a)と同様な2重すべり帯を、また $\{112\}$ 面側の面内では主すべりが顕著で、それに直角交差した細かいすべり帯が見られる。したがって両者の方位面は類似のすべり状態を示しているが、粒界付近に近づくと次第に写真-3の(b)に示したように異方向に連続したすべり帯となってくぼみ、粒内に向っては互いにとり起状になっている。また写真-3の(c)に示した液体状の潤滑剤では、一般に境界潤滑となるので平坦化されると考えられる。 $\{111\}$ 面側ではかなりのすべり帯がみられるが、 $\{112\}$ 面側では粒界から離れるとすべり帯は次第に消滅して平坦化する。図-2の(b)と(c)は写真-3の観察結果の記録曲線で、立体的にみた凹凸曲線からも同様な説明ができる。

また、圧縮面に $\{100\}$ 面と $\{110\}$ 面をもつ双結晶試料をジョンソンワックスを用いてひずみ量0.3まで圧縮した結果を写真-4の(a)、(b)および図-2の(d)に示した。このような二つの方位面を組合わせた試料では、隣接する結晶のすべり帯は結晶粒界を貫いて連続してみえるので、粒界付近のくぼみはほとんど認められない。

以上の双結晶試料を用いた潤滑圧縮によって、加工表面に現われる凹凸の生成は二つの機構によることがわかった。その一つは結晶粒内にみられた微視



(b)は(a)の拡大写真

写真-4 双結晶(III)の潤滑圧縮した加工面

的な凹凸模様、他の一つは結晶の粒界付近 (G.B) にみられる巨視的なくぼみであり、これらの凹凸およびくぼみの程度は圧縮面の異なった方位面の組合せに関係していることが明らかである。

3・3 アルミニウム3結晶試料

これまでの単結晶試料および双結晶試料を用いた実験結果を、本項では3結晶試料に応用し、圧縮面上の1点で交差した異なった3つの結晶粒の方位面と結晶粒界との関連によって加工面の凹凸現象を調べた。用いた試料の圧縮面は図-3の(a)で示し、{112}面の記号A、{100}面のBと{110}面のCからなる方位面で、それぞれA、B、Cの結晶粒の粒界の交差角も異なっている。加工はジョンソンワ

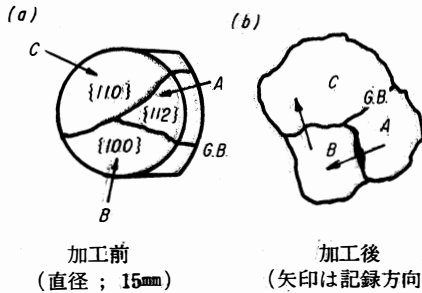
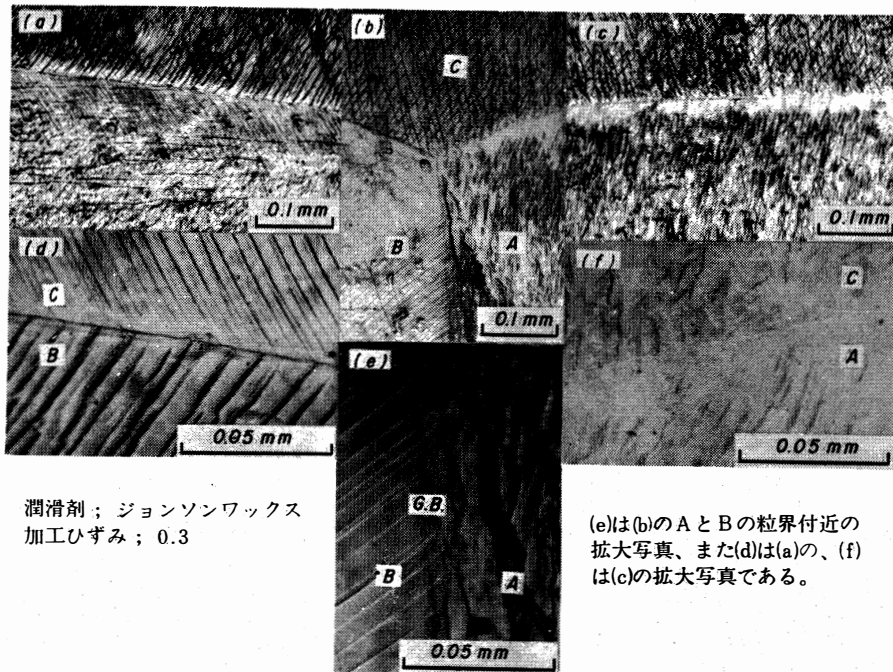


図-3 3結晶の圧縮加工前後における形状変化

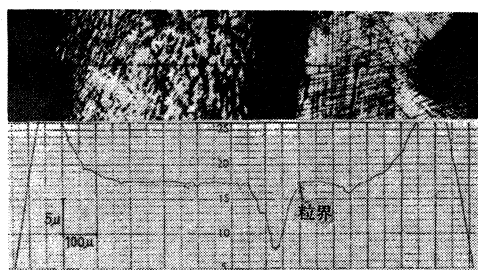
ックスを用いて、ひずみ量0.3まで圧縮した。図-3の(b)は加工後の外観を示した。{110}面はやや相似変形し、{112}面は{100}面を外周方向に押し広げられるように変形するので、{100}面の粒界の交差角が小さくなって円形化している。したがって{112}面と{100}面との粒界付近 (G.B) では、塑性変形が大きいと推定できる。写真-5の観察結果では{112}面と{100}面の小角粒界付近に鋭いくぼみが現われ、これは一見割れのようにみえるが、拡大した(e)でみるとくぼみが明らかである。また、その他の方位面の組合せでは、さきの双結晶試料で示したと同じ傾向でくぼみ、多少大きくなっている程度である。次に、このような加工表面の観察と記録が対応できる結果を図-4に示した。方法は粒界の両端にビッカースの圧痕をつけ、加工後その両端を記録した。以上の観察と記録から3結晶粒による結果を写真-5の(b)をみながら要約すれば、{112}面と{100}面では鋭いくぼみとなり、{110}面と{100}面ではわずかなくぼみ、そして{112}面と{110}面ではくぼみからとっ起化の傾向となる。すなわち粒界の交差した3重点を囲むまわりの3結晶粒では、それぞれの結晶粒内のすべり帯模様は、粒界が個々の結晶粒に



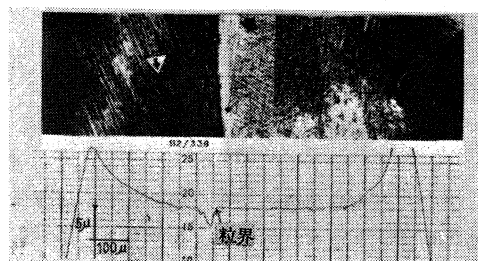
潤滑剤；ジョンソンワックス
加工ひずみ；0.3

(e)は(b)のAとBの粒界付近の拡大写真、また(d)は(a)の、(f)は(c)の拡大写真である。

写真-5 3重点を有する3結晶の潤滑圧縮した加工面



(A)から(B)へ粒界を横断した結果



(B)から(C)へ粒界を横断した結果

図-4 図-3(b)の圧縮加工面の観察と記録の対応
(矢印は記録位置)

依存する結晶面や、粒界の存在する形態などによっても異なるので、それにもとまって粒界付近のくぼみ状態も異なってくると考えられる。

3・4 アルミニウム多結晶試料

結晶粒径0.12mmの粗粒と0.01mmの細粒からなる焼なまし試料をジョンソンワックスを用いて加工ひずみ0.4潤滑圧縮した加工表面の観察を写真-6に示し

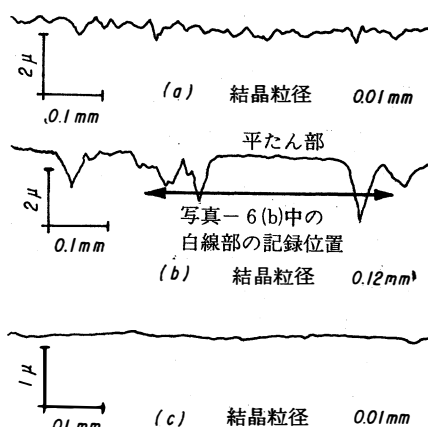
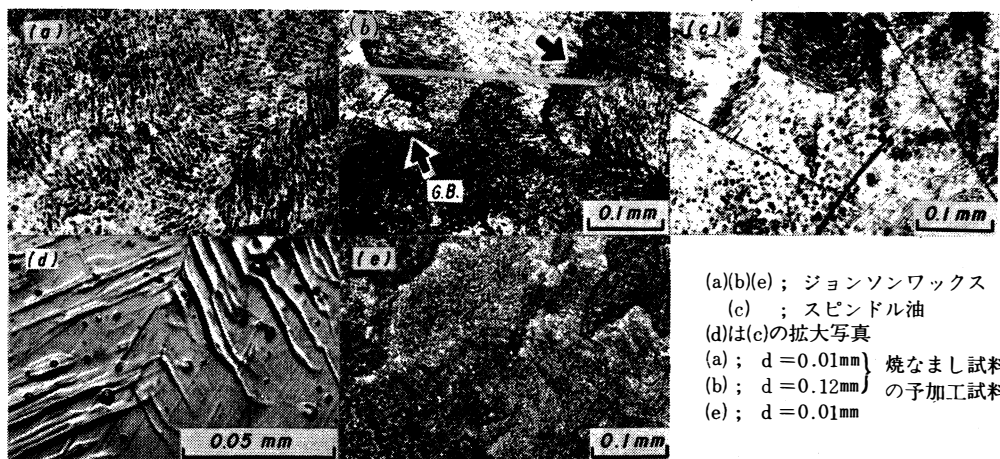


図-5 写真-6(a)(b)(c)の記録曲線

た。(a)の細粒では一面に微細な異方向すべりがグループをなし、グループの境界が網目状の黒い太い線が群がっている。しかし(b)の粗粒では白色にみえる領域が現われ、これは工具面と接して平坦化された接触部であり、その他(a)と同様に粒界付近のくぼみに相当する矢印の黒くみえる部分もある。また(c)、(d)のスピンドル油を用いた場合は白色の平坦部が全体に広がり、ところどころにすべり帯の露出が認められ、(d)の拡大写真ではこの状況が一層明らかである。それで、以上の観察した加工表面の記録曲線を図-5に示した。(a)の細粒試料では微細な凹凸曲線の連続となり、結晶粒径ごとの大きさとほぼ一致した周期となるが、(b)の粗粒試料ではところどころ平坦な部分がみられ、図の矢印内は写真-6(b)の白線部に相当する記録位置で、白色部が平坦であ



(a)(b)(e); ジョンソンワックス
(c); スピンドル油
(d)は(c)の拡大写真
(a); d=0.01mm } 焼なまし試料
(b); d=0.12mm } の予加工試料
(e); d=0.01mm

写真-6 アルミニウム試料の潤滑圧縮した加工面

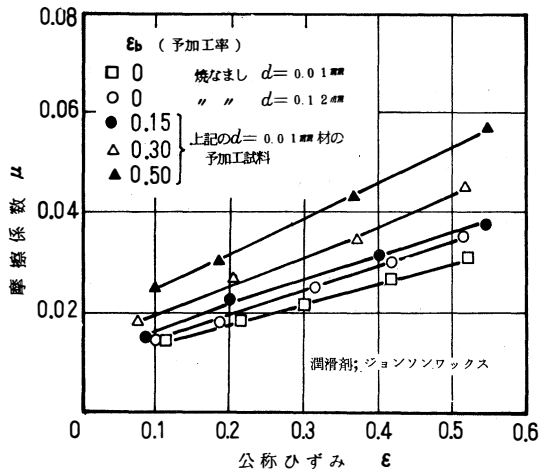


図-6 アルミニウム多結晶試料の摩擦特性に及ぼす結晶粒径と予加工の影響

ることが明らかである。また、(c)のスピンドル油では全面が平坦化している。以上の結果、潤滑剤は圧縮中、材料の加工面に凹凸を生成し、そのくぼみにプールすることによって潤滑作用が良好になると考えれば、結晶粒径が小さいほど潤滑作用は良好になるはずで、これは著者らがすでに発表した図-6に示した結果で明らかである。すなわち結晶粒径の小さい焼なまし材は摩擦係数が小さく、潤滑作用が良好であるという結果が明らかである。

次に、予ひずみを与えた材料の潤滑作用についても調べてみた。予ひずみ試料は焼なまし素材を引張り変形したくびれ部から採取して軸方向に圧縮した。写真-6の(e)は予ひずみ0.4(平均断面収縮率)を与え、その後ジョンソンワックスを用いて圧縮ひずみ0.4まで再加工した結果である。結晶粒径は写真-6の(a)で示した細粒とほとんど変わらないにもかかわらず、圧縮後の表面形態は写真-6(b)の粗粒試料と類似であり、潤滑作用が予ひずみの増加とともに悪くなり、摩擦係数も大きくなっていることは、図-6とよく対応する。それで、理由は以下のように考えられる。予加工の初期において結晶粒界に向かって集積した転位の密度が大きくなり、粒界付近が強化され、すべりに対して障壁となること、また、圧縮前一方方向に引張り加工した予ひずみによって隣接している結晶粒間の変形は、加工軸方向につながるようになって方位差が小さくなっていたことも考えられる。したがって、写真-6(e)に示したように圧縮し



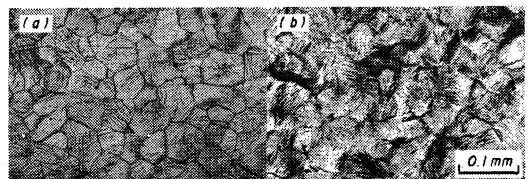
写真-7 純銅試料の潤滑圧縮した加工面(ジョンソンワックス)

て、併合した大結晶粒のような加工表面が観察され、潤滑作用は悪くなったと考えられる。

3.5 その他の純金属多結晶試料

写真-7は純銅の粗粒試料と細粒試料をジョンソンワックスを用いて、加工ひずみ0.2まで圧縮した表面の観察結果である。凹凸面の生成は、アルミニウム多結晶とやはり同様、隣接結晶粒間の変形の差によって粒界付近にくぼみを生じ、結晶粒径の相違による傾向も同様であり、細粒は粗粒よりも潤滑作用が良好である表面状態を示している。

写真-8は焼なましをした工業用純鉄の潤滑圧縮



(a) ジョンソンワックス (b); PTFE フィルム

写真-8 純鉄試料(d=0.05mm)の潤滑圧縮した加工面

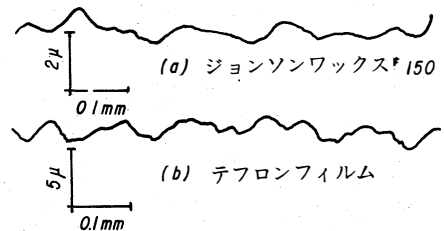
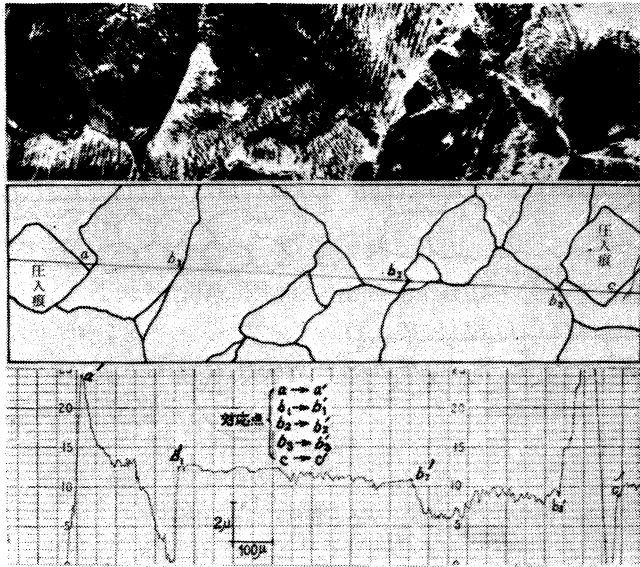


図-7 写真-8の記録曲線



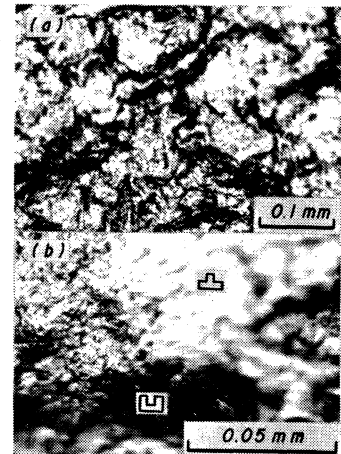
上段；観察写真、中段；対応の見取図、下段；記録曲線

図-8 純鉄試料 ($d=0.36\text{mm}$) の潤滑圧縮した加工面の観察と記録の対応 (ジョンソンワックス)

した結果である。使用潤滑剤にはPTFEフィルムも加え、加工ひずみを小さくして潤滑剤の閉込められる加工初期の過程に注目した。アルミニウム多結晶の圧縮結果に比べれば、粒界および粒内の凹凸挙動は一層顕著に現われ、(b)は(a)よりも著しくなっている。図-7に示した記録曲線の縦倍率に注意してみると、テフロンフィルムによる潤滑ではジョンソンワックスよりもくぼみの面積は大きくなるので潤滑剤の補そくされた量の多いこともわかる。また、写真と記録を対応させた結晶粒径 0.36mm の焼なまし純鉄試料による結果を図-8に示した。写真の記録線上の白色部は平たん面であり、黒色部の b_1 および b_2 では、その粒界付近で大きなくぼみを生じ、その他の粒界ではくぼみはみられないが、この理由はさきのアルミニウムの圧縮結果を参考にすれば、隣接する結晶粒の方位の組合せによると説明できる。(写真-4を参照)

以上の実験で用いた試料は、面心立方格子のアルミニウムと銅、そして体心立方格子の鉄であり、実験結果では加工表面のあらさの生成機構はよく一致した。

次に、すべり系の少ないちゅう密六方格子金属である亜鉛試料について行った。写真-9は純鉄と同



(b)は(a)の拡大写真
ジョンソンワックス

写真-9 純亜鉛試料 ($d=0.05\text{mm}$) の潤滑圧縮した加工面

じく加工初期に注目して、ジョンソンワックスを用いた圧縮結果である。この金属でははっきりとしたすべり帯はほとんど認められず、(a)の粒界に相当する部分に黒い帯状の部分がところどころ認められ、粒内では不規則な方向で微細な多くの斑点が認められる。それで帯状の部分をさらに拡大した(b)でみると粒界付近のくぼみに相当すると思われる斜影であり、写真の中心部は鋭角なとっ起状になっている。したがって、これまでに用いた純金属に比較すれば結晶粒ごとの周期と一致しないあらさ曲線になっていることが想像できる。それで、この結果の一般性を考慮して、これまで小坂田が発表した同じ結晶系のマグネシウム試料による加工表面のあらさ曲線を引用して図-9に示し、凹凸の生成機構を検討した。結晶粒径は 0.045mm であるのに約10倍に相当する周期で、その間には微細な凹凸もあるが、おおむね数個以上の結晶粒が併合した凹凸であるとみなすことができる。

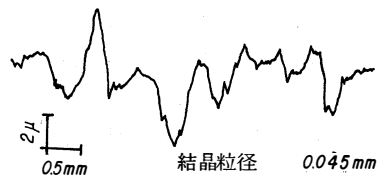


図-9 2%圧縮後のマグネシウム試料の加工面⁽¹²⁾

4. 潤滑機構図

以上の各項にわたる実験結果と考察によって、多結晶純金属の潤滑機構図は加工表面のあらさの生成機構と潤滑作用との一致した関係から求められた。図-10は面心および体心立方格子金属であるアルミニウム、銅および鉄の冷間圧縮における潤滑機構図である。おおむね結晶粒ごとに凹凸を示している。また図-11はちゅう密六方格子金属である亜鉛とマグネシウムにおける潤滑機構図である。被加工金属表面の凹凸はおおむね数個の結晶粒ごとのあらい周期面あらさとなる。

5. 結論

潤滑剤を用いて金属を冷間加工するとき、摩擦作用をできるだけ小さくするための金属の潤滑挙動は以下ようになった。

(1) 静的圧縮加工において、潤滑剤が工具面と被加工金属面間に閉込められる機構は、潤滑剤が流体圧効果をもたらすため、金属の自由表面の加工組織と類似した凹凸を生じた。

(2) 加工表面の凹凸の生成は単結晶では微細で、双結晶そして多結晶になると著しくなるが、この理由は隣接結晶粒の方位差と交差角に依存し、異方向すべり現象が潤滑作用を良好にする。

(3) 結晶粒径が小さくて、方位差のある結晶粒の配列を有する金属の潤滑圧縮では、加工表面の凹凸曲線の周期は小さく連続したあらさ曲線となるので、潤滑作用が良好である。

(4) 面心立方格子および体心立方格子の焼なまし純金属では各結晶粒ごとのくぼみの連続が加工表面あらさとなるが、ちゅう密六方格子の純金属では数個以上の結晶粒が併合したあらい凹凸となる。

(5) 予ひずみを与えた金属の潤滑圧縮では、隣接結晶粒のいくつかが併合した周期の大きなあらさ曲線となり、ところどころ平坦部が認められるので、焼なまし材よりも潤滑作用は悪くなるが、平滑な仕

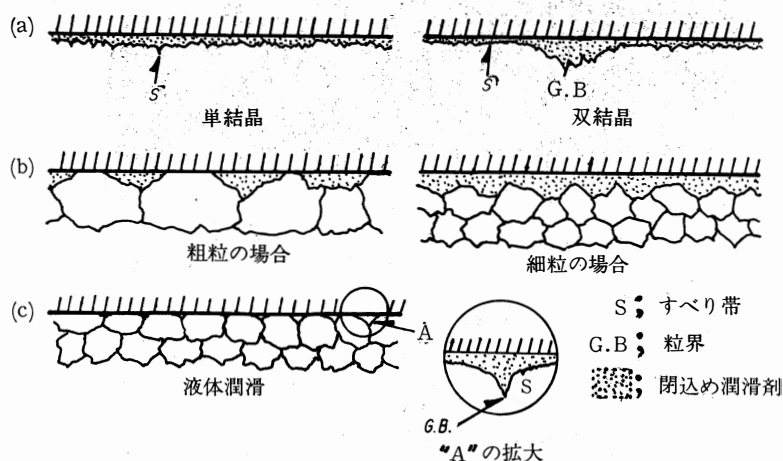


図-10 面心および体心立方格子金属の潤滑機構図



図-11 ちゅう密六方格子金属の潤滑機構図

上げ面となる。

参考文献

- (1) L.H.Butler ; J. Inst. Metals, 88 (1959), 337.
- (2) L.H.Butler ; J. Inst. Metals, 89 (1960), 116.
- (3) L.H.Butler ; J. Inst. Metals, 89 (1960), 449.
- (4) 田中英八郎、吉識忠継、福田次男 ; 塑性と加工、1、№3 (1960)、167.
- (5) 田中英八郎、瀬本正三、鈴木善彦 ; 金属学会誌、28 (1964)、228.
- (6) 田中英八郎、瀬本正三、鈴木善彦、渡辺貞夫 ; 塑性と加工、6、№50 (1965)、48.
- (7) 田中英八郎、池田圭介、福田次男、徳能裕己 ; 金属学会誌、33 (1969)、10.
- (8) 時沢貢、山田正夫、松木賢司 ; 軽金属、19(1969)、142.
- (9) 時沢貢、吉川和男 ; 精密機械、36 (1970)、107.
- (10) 時沢貢 ; 精密機械、36 (1970)、808.
- (11) 時沢貢 ; 精密機械、37 (1971)、715.
- (12) 小坂田宏造 ; 日本機械学会、第3企画部会、塑性加工と表面仕上げ状態研究資料 (第1回)、(1970)、4.

本研究は昭和48年11月6日第24回塑性加工連合講演会(岡山)にて講演